

多準位系原子の動的スペクトル特性に関する研究

著者	山岸 昭雄
号	347
発行年	1971
URL	http://hdl.handle.net/10097/9083

氏 名 (本籍)	山 岸 昭 雄 (長野県)
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 博 第 3 4 7 号
学位授与年月日	昭和 4 7 年 3 月 2 4 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 (博士課程)電子工学専攻
学位論文題目	多準位系原子の動的スペクトル特性に関する研究
	(主査)
論文審査委員	教授 稲場 文男 教授 高橋 正 教授 清野 節男 教授 小野 昭一

論 文 内 容 要 旨

今世紀に入り非常に多数の原子，分子の存在が確認されているが，量子エレクトロニクスの応用等それら原子，分子の活用を考える際，必ずしもそれらの内部構造等に関する知識が十分であるとは言えない。その意味で現在，それら内部構造等に関する情報の収集段階であると考えられる。従って，各種の原子（分子）について，より多くの基礎知識を得ることは，物理学的に意義があるばかりでなく，原子（分子）の量子エレクトロニクスの応用に際しても重要な役割を果たすものである。

一般に原子（分子）は，電磁波（光）と相互作用して，その内部構造に関する情報を電磁波（光）に伝達する。分光学は，このような原子（分子）と相互作用する電磁波（光）を媒介として原子（分子）のもつ種々の情報を知ることが目的とするものであるが，用いられる手段は多種多様にわたっている。しかし，それらのほとんどは，原子（分子）のもつエネルギー準位のうち 2

準位のみに関係する取扱いである。実際の原子(分子)は多数のエネルギー準位をもち、これが同時に異周波の電磁波と相互作用するときには、2準位系原子(分子)とは異なる振舞をすることが予想される。このような多準位系原子(分子)の特性の分光学的知識が豊富になれば、より広い工学的応用を計るための有用な基盤となりうるであろう。

このように原子(分子)と相互作用する光を媒介とする場合、問題になるのは光のもつ情報である。光はそれ自身の情報(スペクトル幅)——究極的には原子(分子)のエネルギー準位幅に起因するものではあるが——と原子(分子)のエネルギー分布に関する情報とを有している。前者を取扱う分光学的手段にはスペクトル測定や光の時間的相関々数の測定等があり、後者の例には Hanle effect や各種の Life time 測定等を挙げることができる。両者とも周波数領域における測定と時間領域における測定とがあり、それぞれは一定の関係(フーリエ変換)で結びつけられる。従来時間および周波数領域における取扱いは、その受け持つ領域が異なっていた——時間的測定は比較的低周波域、周波数的測定は比較的高周波域——が、レーザーの出現とパルス技術の進歩により、現在では両者の領域はかなり重複してきている。

しかし、それぞれの測定法には長所短所があり、得られる情報の種類がやや異なる場合もあるので、前述の多準位系原子(分子)と光との相互作用を取扱う際にも、周波数と時間の両側面から現象を綿密に観測する必要があると判断される。

本研究は、このような観点から、多準位系原子が複数の異なる波長の光と相互作用する場合の挙動について、周波数並びに時間領域の両側面から系統的検討を加えたものである。

周波数領域においては、狭いスペクトル幅と強い強度をもつレーザーをとりあげ、その発振スペクトルの分光学的特性について検討し、さらに多準位系原子(分子)の分光学的応用をレーザー物質以外の一般の原子(分子)に適用するため、時間領域においては、光子相関法をとりあげて、その特性を明らかにした。

第2章では、レーザー分光学への応用を目的として、3準位系気体原子における2遷移レーザー発振現象をとりあげ、半古典論を用いて理論的に解析し、その動作特性、特にその発振スペクトル特性について詳細な検討を行なった。3準位系2遷移発振レーザーにおいては、その発振スペクトル特性曲線上に Lamb dip 以外に特有の dip や bump が現われる。これらは、共通準位の population や2光子過程を通じて2遷移が結合するために生ずるものであり、励起密度の高い場合には、競合効果により dip の中央部に微細構造が現われることを明らかにした。これらの特性変化の様子を詳細に調べることににより、関係する物理的パラメータの値を求めることが可能となるものである。

第3章では、He-Neレーザーによる $0.63\ \mu\text{m}$ ($3S_2 \rightarrow 2P_4$) と $1.15\ \mu\text{m}$ ($2S_2 \rightarrow 2P_4$) の下準位共通型単一モード2遷移発振を実現し、そのスペクトル特性の測定を行なった。その結

果，理論的に予想された dip や その形の微細構造を観測し，第 2 章の解析結果とよく一致することを確認した。2 準位系レーザーの場合の Lamb dip とは異なり，このような dip の幅には共通準位の線幅が直接関係するため，各準位の線幅を独立に求めることも可能である。すなわち，3 準位系における 2 遷移の同時発振スペクトル特性は，量子エレクトロニクスのに興味深いばかりでなく，分光学にも有用かつ精密な情報を与えるものであることも明らかにした。

第 4 章では，多準位系原子の振舞を時間的側面からとらえるために，新しい分光学的測定方法である光子相関法をとりあげ，多準位系原子から放出される異周波光子間の時間的相関々数の解析を行なった。先づ 3 準位系原子から，カスケード遷移により引き続いて放出される 2 個の異周波光子間の時間的な相関を測定することにより，さらに 4 準位系原子における異周波光子間の相関からは，中間 2 準位の平均寿命に関する情報とともに，Lamb shift に関する知見も得られることを明らかにした。このような光子相関法は，従来の寿命測定法にない下記のような長所をもつため，今後の利用が期待されるものである。

- (1) より高い位置にある準位からのカスケード遷移に起因する測定誤差が入らない。
- (2) 適当な 3 準位さえあれば，被測定準位は 1st excited level に限らず，どんなエネルギー状態にあってもよい。
- (3) 広い圧力範囲での測定が可能である。
- (4) 比較的高分解能である。

第 5 章では，光子相関法による原子の励起準位寿命測定を最も合理的に且つ効果的に行なうため，測定条件の解析を行ない，最適動作条件を求めた。測定結果の判定の目安としては，コントラスト因子 η と S/N 比の 2 つが考えられ，それぞれ back ground に対する signal の大きさおよび測定値の分散に対する signal の大きさの比で表わされる。コントラスト因子 η と S/N 比を最大にする測定条件は，必ずしも同じではない。しかし，実際の測定系の備えている条件を検討し，コントラスト因子 η または S/N 比の何れかを最大にするような条件（発光強度）で測定することが，測定時間の短縮と精度の向上という面から是非とも必要なことであると言える。

なお，本章での解析結果から，次の条件を満たす遷移やスペクトルを選ぶことが望ましいと結論される。

- (1) 遷移確率のできるだけ大きなカスケード遷移の組を選ぶ。
- (2) コントラスト因子 η を増大させるため，選択的励起を行なう。
- (3) 光検出器の感度の高い波長域にあり，近傍に他のスペクトルのない，孤立したスペクトル線を選ぶ。
- (4) Radiation trapping を除くため，基底準位への遷移を避ける。

第4章で解析した光子相関法は、第5章の検討結果から明らかなように、簡単なエネルギー単位構造をもち、発光スペクトル分布が粗であるほど高いコントラスト因子が得られる。水銀原子はこの条件を満たすものであり、またその励起準位 6^3P_1 は各種の寿命測定法の標準試料となっている。第6章では、光子相関測定装置の諸特性の検討を行ない、標準試料である水銀原子の励起準位 6^3P_1 の輻射平均寿命を測定した。図1に測定装置を示す。全測定系の分解能は光電子増倍管の特性により決定され、実測の結果 $7 \sim 8 \text{ nsec}$ が得られた。次に 6^3P_1 に関する多数

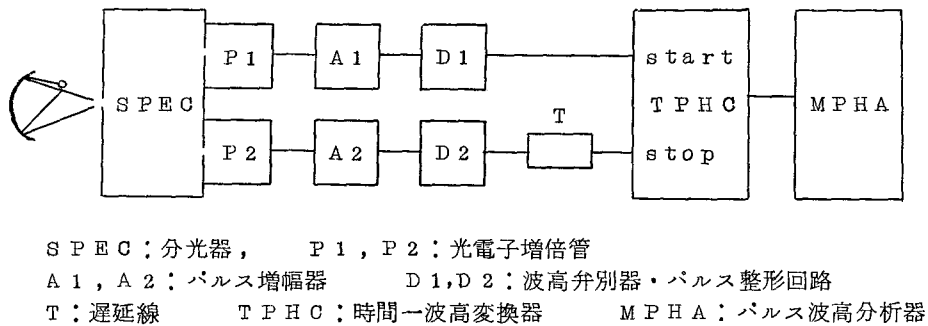


図1 光子相関法測定装置のブロック図

の遷移のうち、前章の条件に最も近い遷移の組合せとして、図2に示す3準位系を選んだ。同図に示すように光子 ν_1 (4358 \AA) をP1で、光子 ν_2 (2537 \AA) をP2で検出すると、MPHA上には ν_1 が放出されてから ν_2 が放出されるまでの時間差に対するその頻度が図3のように表示される。

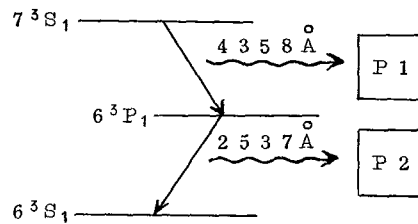


図2 水銀原子におけるカスケード型3準位系と遷移波長

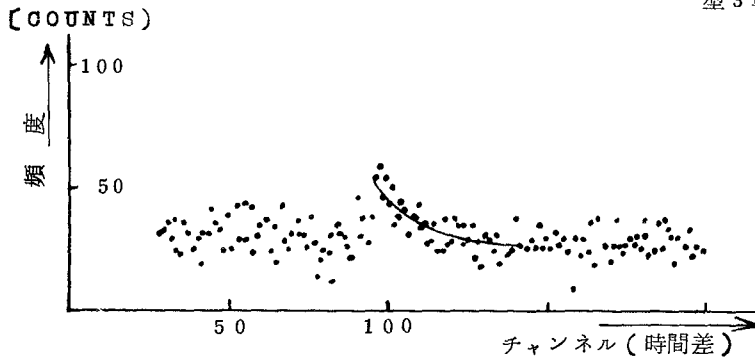


図3 光子相関法による平均寿命測定
時間基点は、遅延線により94チャンネルに設定されている。実線は最小自乗法により求められた指数関数を表わす。

こうして得られた水銀原子の励起準位 6^3P_1 の輻射平均寿命は $103 \pm 30 \text{ nsec}$ であり、従来種々の測定方法により求められている値 ($98 \sim 120 \text{ nsec}$) とよい一致を示している。

水銀原子の寿命測定の結果、測定条件を吟味することにより光子相関測定法がさらに複雑なエネルギー構造をもつ原子(分子)に対しても、適用可能であろうと推測された。一般に多くの価電子をもつ気体原子の寿命測定には、そのエネルギー準位構造に起因する種々の困難が伴う。しかしそれらは光子相関法により取り除かれうるものであり、そこに光子相関法の有用性が発揮されることになる。

第7章では、量子エレクトロニクスの重要な原子である Ne を取りあげ、そのエネルギー準位と遷移波長、遷移強度等について検討し、検出器および分光系の有効立体角の低下を考慮してもなお光子相関法による寿命測定が可能であることを示した。その検討結果に基づき、図4に示す3準位系を用いて、Ne 原子の励起準位 $2p_8$ および $2p_9$ の平均寿命を測定した。測定結果を図5に示す。さらに平均寿命の圧力依存性と零圧力での値から求めた Ne-Ne 衝突断面積および輻射平均寿命を表1に示す。

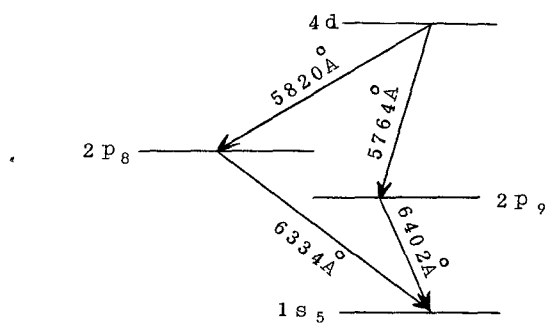


図4 Ne原子におけるカスケード型3準位系と遷移波長

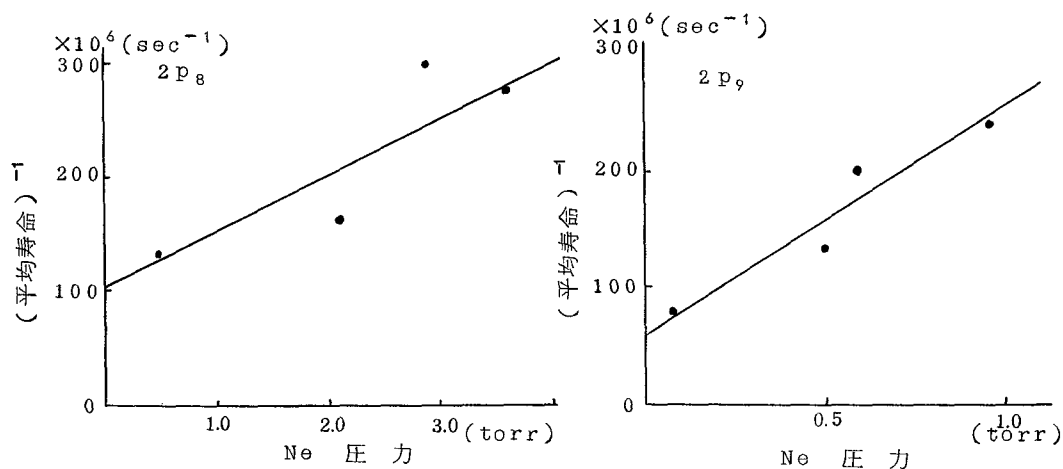


図5 Ne原子励起準位 $2p_8$ および $2p_9$ の平均寿命

エネルギー準位	2 p ₈	2 p ₁
Ne-Ne 衝突断面積 ($\times 10^{-15} \text{cm}^2$)	2.4 \pm 0.8	9.2 \pm 1.7
輻射平均寿命 (nsec)	10.6 \pm 5.1	17.4 \pm 3.7

表 1 Ne 原子の励起準位 2 p₈ および 2 p₉ の衝突断面積と輻射平均寿命

このように、従来ほとんど測定されていなかった Ne 原子の励起準位の平均寿命を測定し、複雑なエネルギー構造とスペクトルをもつ原子（分子）に対しても、光子相関法の適用が可能であることを明らかにした。

第 8 章では、以上各章の理論的解析および実験結果を集約して結論を述べた。本研究は、多準位系原子が光と相互作用する際の動的な挙動に主眼をおき、光を媒介としてその物理的振舞を観測することにより、原子のもつ分光学的情報を得る目的で行なわれたものである。本論文で明らかにした多準位系原子の動的諸特性の研究方法は、分光学的により広い基礎知識を得るための手段として十分実用に供されるものと期待される。

終りに本研究を進めるにあたり、終始御指導、御鞭撻を賜った稲場文男教授、有益なる御教示を賜った高橋正教授、清野節男教授、小野昭一教授に深く感謝致します。

審 査 結 果 の 要 旨

近年，電子工学の発達につれて，種々の物質の物性的特性が応用されるに伴い，それらの精密な知識が一層要求されて来ている。レーザー工学の分野においても，その発振は原理的には2準位系で達成されるが，実際の物質は多数のエネルギー準位をもつため，それらの相互作用がレーザーの動作特性に大きく影響する。従って，その基本となる多準位系原子の動的挙動の研究は量子電子工学において欠くことのできない重要な知識を与えるものである。

著者はこのような観点から，複数の波長の光と相互作用する多準位系のスペクトル特性を周波数ならびに時間領域の両面から追究して，理論と実験による系統的研究を進めて来た。本論文はそれら一連の成果をとりまとめたもので，全文8章および付録からなる。

第1章は総論である。第2章では，3準位系気体原子による2遷移発振レーザーの理論的解析を行ない，発振スペクトル構造と2遷移間の競合現象を定量的に明らかにしている。

第3章では，前章の理論的結果にもとづいて，代表的なHe-Ne気体レーザーで，波長 $0.63\mu m$ と $1.15\mu m$ の2遷移発振を実現して，そのスペクトル特性の微細構造を測定している。それらは解析との良好な一致を示しており，レーザー分光学の新しい知見として貴重なものである。

第4章以下は，多準位系原子から放出される異なる波長の光子間の時間相関にもとづく，新しいスペクトル解析法に関するものである。先づ第4章では，光子相関法を3準位および4準位系に適用する場合の，基本的特性を量子力学を用いて理論的に解析して，その相異を明らかにすると共に，有用な情報が得られることを解明している。

第5章では，その解析結果から光子相関法により，多準位系原子の励起準位の平均寿命の測定の可能なことを示し，測定上問題となる真正相関と偶然相関の比や信号対雑音比についての定量的な考察から，測定系の最適動作条件を具体的に明らかにしている。

第6章では，光子相関法により相関率の高い短波長の水銀原子スペクトルを用いて励起準位の寿命測定を行ない，従来別の方法で求められた値とよく一致する結果を得て，本方法が有用なことを確めている。

第7章では，光子相関法をこれまでに測定が行なわれていなかったネオン原子にはじめて適用して，レーザー発振に関与するエネルギー準位の放射寿命と原子間の衝突断面積を定量的に求めている。この結果はレーザー工学上有意義なもので，今後光子相関法が他の数多くの原子や分子の動的スペクトル特性の測定に応用できることを明示するものである。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は，従来研究の余り見られなかった，多準位系原子が光と相互作用する際の物理的挙動を，周波数および時間の両領域にそれぞれ特有の方法を通して，把握することを試みたもので，一方ではレーザー分光技術をより精密なものとし，また他方では光子相関法の有用性を明確に示して，いくつかの貴重な知見を与えたものであって，電子工学に寄与するところが少なくない。

よって，本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。